

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ МИКРОСПУТНИКОВ

**З. В. Кенько, В. И. Мечинский, С. В. Лешкевич,
В. А. Саечников, А. А. Спиридонов**

Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

E-mail: sansan@tut.by

Рассматриваются оптические методы определения траекторий и параметров движения микроспутников. Описывается программно-аппаратная реализация измерительной системы и основные этапы определения параметров орбиты микроспутников по результатам оптических измерений.

Ключевые слова: космический объект, контроль космического пространства, оптические измерения.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным освоением космического пространства многими странами определение орбит и сопровождение (каталогизация) запускаемых ими космических объектов (КО) стало одной из актуальных задач военного и народно-хозяйственного значения. Кроме того, определение орбит и параметров движения космического аппарата (КА) в процессе его полета, так называемые внешнетраекторные измерения, является частью баллистического обеспечения полета. Поэтому системы контроля космического пространства (ККП) активно развиваются с момента запуска первого искусственного спутника Земли. Надо отметить, что в США в конце 1950-х – начале 1960-х гг. прошлого столетия была создана национальная система слежения за космическим пространством SPADATS, осуществляющая наблюдение за КО с помощью радиолокационных, оптико-электронных и радиотехнических средств, размещенных по всему земному шару. Аналогичная система контроля космического пространства СККП Космических войск была создана в бывшем Советском Союзе (сейчас она принадлежит Российской Федерации). В настоящее время большое количество стран осуществляют мониторинг космического пространства как в военных и гражданских целях, так и для осуществления международного информационного взаимодействия. Особенно значимо это взаимодействие при решении задач, связанных с возникновением нештатных ситуаций, таких как «потеря» космического аппарата или отказ бортовых систем связи, когда становится невозможной оценка технического состояния систем управления аппаратом.

Системы ККП осуществляют сбор, прием и предварительную обработку информации от средств наблюдения, идентификацию поступающих измерений с орбитами известных КО, первоначальное определение орбит вновь запускаемых КО, уточнение орбит КО и прогнозирование движения КО, селекцию космических объек-

тов на фоне последних ступеней ракет-носителей, фрагментов и осколков, планирование наблюдений (расчета и выдачи целеуказаний наблюдательным средствам), определение продолжительности существования КО, времени и возможного района их падения, сопровождение КО (периодического уточнения орбит КО с требуемой точностью, обеспечивающей идентификацию поступающих по КО измерений) и ведение Главного каталога системы ККП.

Сегодня широко применяют различные типы измерительных систем: радиотехнические, оптические, гравиметрические, магнитометрические и т. д. Основными видами внешнетраекторных измерений являются радиотехнические и оптические [1]. Проведение радиотехнических и оптических измерений связано с определением некоторых геометрических и кинематических характеристик или временных сдвигов, отнесенных к фиксированным в пространстве точкам (базисным точкам). Базисными точками могут быть стационарные, самолетные измерительные пункты, радиомаяки для радиотехнических измерений или естественные ориентиры, звезды, центры касания линий визирования видимых дисков планет для оптических измерений. Радиотехнические измерения основаны на использовании свойств изменения характеристик радиосигнала, обусловленного изменением параметров движения летательного аппарата, оптические измерения основаны на использовании свойств прямолинейности распространения света в однородной среде.

ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Каждый вид измерений имеет свои преимущества и недостатки. Радиотехнические измерения могут быть проведены при любых погодных условиях на значительных удалениях КА от базисных точек. Но они возможны при условии прямой видимости аппарата из базисных точек, их проведение вблизи Земли предполагает учет рефракции и рассеяния радиоволн, активная радиолокация связана с дорогостоящей аппаратурой, а пассивные радиотехнические методы возможны лишь при излучении летательным аппаратом сигнала. В спутниковых системах внешнетраекторных измерений часто этот сигнал передается по командной или телеметрической радиолинии, что упрощает аппаратную реализацию и стоимость измерительной системы.

Оптические методы просты в осуществлении, требуют менее дорогостоящую аппаратуру и обладают приемлемой точностью. Но так же, как и радиотехнические измерения, возможны при условии прямой видимости аппарата из базисных точек, их проведение вблизи Земли предполагает учет рефракции и рассеяния. Главным недостатком оптических измерений являются ограничения по времени суток и по погоде. Работать они могут только в ночные часы и только при отсутствии облачности.

Важная проблема, возникающая в процессе оптических измерений – влияние рефракции, особенно в случае, где выполняются измерения больших углов на небесной сфере. Рефракцию можно разделить на нормальную (табличную) и аномальную. Точность учета нормальной рефракции определяется качеством модели стандартной атмосферы и до зенитных расстояний не более 70° составляет $0,01''$ и выше. Аномальная рефракция, такая как инструментальная и павильонная, учитывается обычно достаточно хорошо с помощью систем сбора метеоданных.

Труднее устранить влияние флуктуации рефракции, обусловленных атмосферной турбулентностью высокой частоты, которые имеют доминирующее влияние.

Спектр мощности дрожаний показывает, что их амплитуда значительна в диапазоне от 15 до 0,02 Гц. Отсюда следует, что оптимальное время регистрации небесных объектов должно быть не менее 50 с.

В настоящее время перспективными являются высокоточные системы определения положения, скорости и ориентации КА на основе данных, поступающих от многоканальных ГЛОНАСС/GPS-приемников и их комплексирование с инерциальными системами навигации. Но решение задачи навигационно-временного определения предъявляет значительные требования к объему информации, быстродействию и памяти бортовых ЭВМ. Поэтому выходом из положения, особенно для микроспутников, может стать проведение внешнетраекторных измерений с использованием ретранслированных сигналов спутниковых радионавигационных систем и решение навигационной задачи на измерительном пункте.

При радиотехнических методах информацию об КА получают в результате приема и анализа электромагнитных излучений непосредственно от самого КА. Это электромагнитное излучение может быть основным или собственным излучением объекта, например, при его работе на передачу или при радиолокации, тогда оно носит детерминированный характер со строго определенной пространственной, временной и спектральной структурой. Излучение от КА может быть вторичным, возникающим в результате отражения или рассеяния электромагнитных волн, облучающих КА. Характеристики вторичного излучения зависят от отражательной способности, геометрической формы и размеров объекта, поляризации падающего излучения, взаимной ориентации источника и объекта, от параметров их относительного движения.

При оптических измерениях обнаружение производится в пассивном режиме, вследствие чего оптические комплексы обладают низким энергопотреблением. Носителем сигнала о космических объектах является отраженное от их поверхности солнечное излучение. Контроль космического пространства начинается с наблюдения за полусферой небосвода, обнаружения космических объектов и определения их траекторных параметров. Затем производится их фотографирование, т. е. получение оптических изображений, которое позволяет определять внешний вид и параметры движения вокруг центра масс. Следующий этап контроля – определение и каталогизация отражательных характеристик космического объекта в оптическом диапазоне волн. И как итог – распознавание объекта, выявление его принадлежности, назначения и технических характеристик.

Комплексирование оптических и радиотехнических методов измерений траектории и параметров движения КА является современным и перспективным направлением. Это позволит воспользоваться преимуществами каждого из методов, накопить достаточный массив измерений даже при ограниченном времени, исключить грубые ошибки и использовать один из методов в тех случаях, когда другой недоступен, что особенно актуально для определения параметров движения микроспутников.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ

Оптические измерения или оптическая астрометрия космических объектов получила широкое развитие во всем мире в течение последних 20 лет. Это связано прежде всего с применением полупроводниковых панорамных приборов-приемников с зарядовой связью (ПЗС), Благодаря высокой квантовой эффективности, широкому

динамическому диапазону и малому уровню шумов точность ПЗС-измерений положений звезд на матрице возможна до 1–2 % пикселя, а точность фотометрии достигает 0,03 звездных величин. Достигнутая совсем недавно стадия миллисекундной точности переживает процесс активного освоения. Прогресс современной космической техники также способствует развитию оптической астрометрии. Как пример этому реализованный в 90-х гг. XX в. проект Hipparcos – High Precision PARallax Collecting Satellite. Успех космического эксперимента Hipparcos привел к созданию в 1997 г. двух каталогов [2]:

- Hipparcos каталог (НС), включающий 118 тыс. звезд до 10-й величины и точностью положений 0,77/0,64 миллисекунды дуги и 0,88/0,74 миллисекунды/год собственных движений по прямому восхождению и склонению;

- Tycho каталог (ТС), включающий один миллион звезд до 12-й величины с точностью 25 миллисекунд. По сравнению с традиционными наземными определениями в существенно короткие сроки достигнуто почти 100-кратное увеличение точности по пяти астрометрическим параметрам (положения, собственные движения и параллакс) значительного количества звезд.

Кроме того, в современные оптические системы измерений введен режим полной автоматизации наблюдений (роботизация телескопов), с развитием вычислительной техники появилась возможность обработки и хранения огромных массивов данных наблюдений, меридианная астрометрия дополняется радиоастрометрией и космической астрометрией, вместо методики абсолютных позиционных определений используются дифференциальные (относительные) определения.

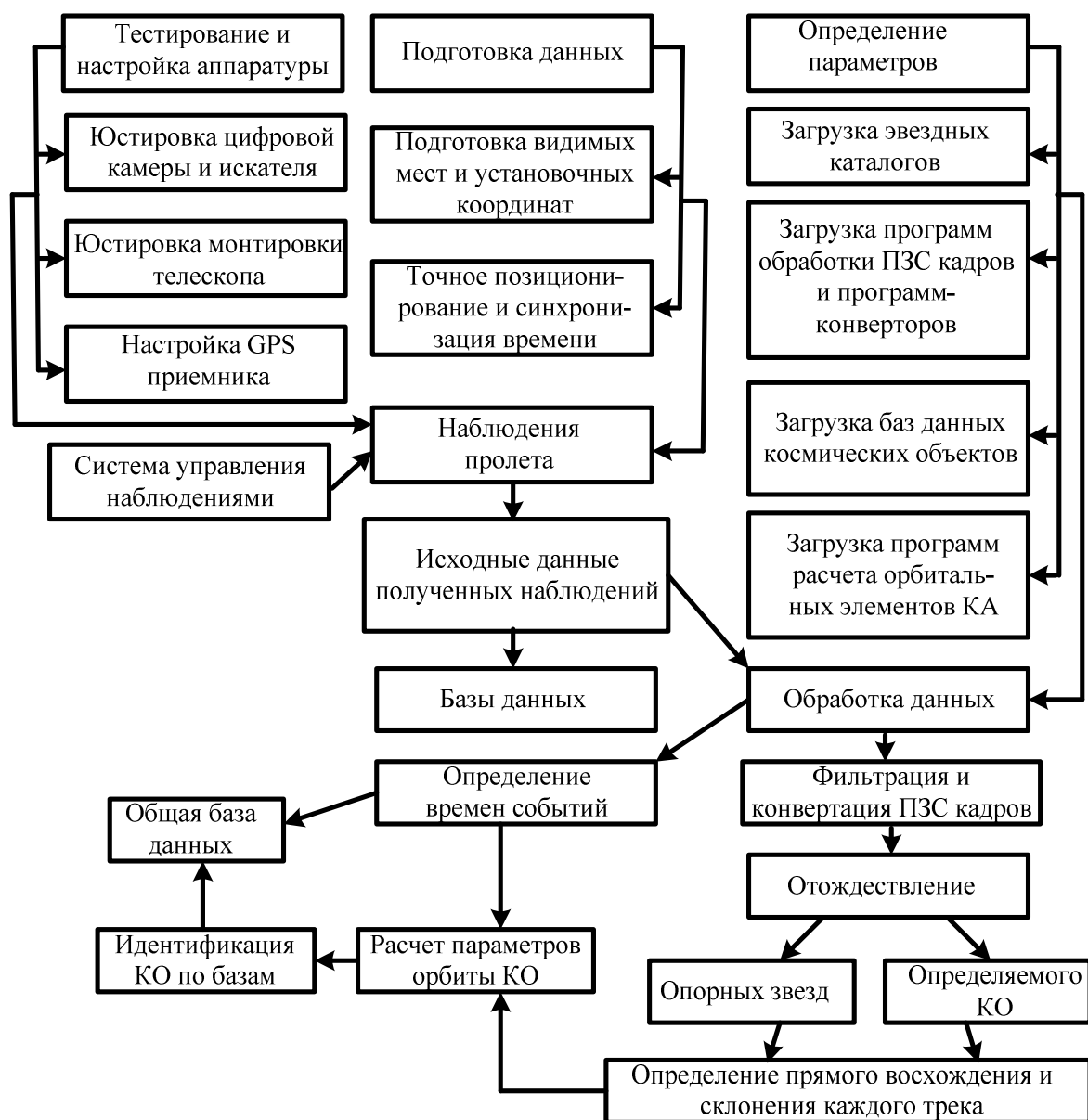
Примерами современных оптических систем измерений могут быть российский оптико-электронный комплекс «Окно», расположенный в горах Таджикистана, и наземная электрооптическая система наблюдения дальнего космоса GEODSS (США), состоящей из четырех станций, примерно равномерно разнесенных вдоль земного экватора (США, о. Диего-Гарсия, Южная Корея, Гавайские острова).

Нельзя не отметить возможность использование глобальных информационных сетей и баз данных как по звездным каталогам, так и по космическим объектам. Одним из способов определения параметров орбиты космических объектов может быть использование систем контроля космического пространства Космических войск РФ и NORAD (North American Aerospace Defense Command, США–Канада).

Рассмотрим основные этапы определения параметров орбиты космического объекта (КО), в качестве которого может быть университетский микроспутник, по результатам оптической астрометрии с помощью мобильной оптической системы. Аппаратная реализация оптической астрометрии космических объектов может быть представлена:

- цифровым фотоаппаратом Canon, выбор в пользу которого сделан из-за большого количества специализированного программного обеспечения для астросъемки, простоты дистанционного управления и возможности фиксировать моменты начала экспозиции с большой точностью;
- монтажкой комбинированного ведения;
- объективом с фиксированным фокусным расстоянием: и большой апертурой;
- искателем для осуществления ведения космического объекта;
- GPS-приемником с выходом 1PPS-сигнала для точного позиционирования и синхронизации;
- ручным спуском для камеры;
- ноутбуком с программным обеспечением и базами данных.

Первый этап оптической астрометрии, как это показано на рисунке, – это подготовка аппаратуры и данных для проведения наблюдений. Тестирование и настройка аппаратуры включает в себя юстировку цифровой камеры и искателя, юстировку монтировки телескопа и настройка GPS-приемника. Подготовка данных для проведения наблюдений предполагает подготовку видимых мест и установочных координат (для этого изучаются особенности метеоусловий и базы данных космических объектов, пролетающих над данной территорией в интервал времени наблюдений), осуществление точного позиционирования и синхронизация времени с помощью GPS-приемника.



Этапы определения параметров орбиты по результатам оптической астрометрии

Второй этап включает непосредственно этап наблюдений пролета космических объектов по заранее разработанному плану, если мы знаем характеристики объекта съемки, время пролета через базисные точки, либо грубый поиск неизвестного космического объекта в широких полях зрения и его съемка. Расчет параметров пролета университетского микроспутника над заданным регионом Земли наиболее удобно осуществлять с помощью программ Heavensat или Orbitron [3]. С их помощью задаем собственные координаты (в системе WGS84: широта – 53.838184° (СШ), долгота – 27.476184° , высота – 250 м), производим загрузку орбитальных элементов университетского микроспутника из базы данных системы NORAD, рассчитываем трек и его время пролета.

Задачу съемки можно разделить на два класса: фотографирование отрезков трека объекта в течение его пролета и видеосъемка в течение его полета. В ходе съемки решаются основные задачи по расчету поля зрения имеющейся оптической системы, расчету экспозиции при съемке данного объекта и расчету фиксации моментов времени. Измерение КО можно осуществлять либо при непрерывном автоматическом сопровождении космического объекта или в режиме дискретных измерений в заданных точках прогнозируемой траектории.

Третий этап обработка данных включает в себя предварительную стадию определения параметров, в которую входят загрузка звездных каталогов, загрузка программ обработки ПЗС-кадров и программ-конверторов, загрузка баз данных космических объектов, загрузка программ обработки снимков и расчета орбитальных элементов КА. Непосредственно процесс обработки начинается с фильтрации и конвертации ПЗС-кадров. Для обработки ПЗС изображений космических и небесных объектов существует большое количество программных пакетов и систем как общего назначения типа MIDAS, IDL, Astrometrica, IRIS и др., так и специального.

Полный алгоритм обработки изображения обычно включает в себя:

- коррекцию геометрических искажений поля;
- цифровую фильтрацию;
- удаление постоянной составляющей сигнала, вызванной фоновой подсветкой и темновым сигналом ПЗС-матрицы;
- определение центра изображения различными моделями аппроксимации и др.

Как пример, цифровая обработка полученных снимков пролета космического объекта с помощью программы обработки снимков IRIS [3] предполагает следующую последовательность обработки:

- конвертирование полученных фотографий из формата RAW в формат PIC;
- калибровка полученных фотографий, это необходимо для максимального снижения влияния искажающих факторов, обусловленных темновым током ПЗС-матрицы, током смещения электронных компонентов камеры, разной чувствительностью к свету пикселей матрицы;
- конвертирование полученных откалиброванных файлов в формат FITS для дальнейшей обработки программой астрометрии IzmCCD [3].

Астрометрия космического объекта на полученных снимках заключалась в отождествлении опорных звезд и определяемого объекта. Окончательный этап включал в себя расчет параметров орбиты КО на основе определенных времен пролета и идентификация КО по существующим базам и занесение его в собственную общую базу данных. Расчет элементов орбиты на основе астрометрических данных осуществлялся с помощью программы ELFIND [3], позволяющей провести вычисления пара-

метров орбиты КО и представить их в TLE-формате в первом приближении и с помощью программы SATFIT [3], уточняющей значения орбитальных элементов.

Повышение точности измерений можно достигнуть в результате применения относительного метода измерений угловых координат космических объектов, с использованием опорных звезд, точности фотометрирования – за счет качественной калибровки по звездам, а также за счет оперативного измерения и учета фона.

Был разработан специальный практикум «ПЗС-астрометрия и фотометрия космических объектов», который направлен на изучение ряда важнейших методов обработки цифровых изображений, используемых в наблюдательной астрономии, с помощью программных ресурсов. Практикум имеет целью получение у студентов навыков определения видимых положений и блеска космических объектов, вычисления их экваториальных координат и звездных величин, изучение методик определения важнейших характеристик и расчетов параметров орбит космических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузнецов, И.* Рефераты, курсовые и контрольные работы / И. Кузнецов, Л. Лойко. Минск : За-вигар, 1998. 125 с.
2. *Иванов, Н. М.* Баллистика и навигация космических аппаратов / Н. М. Иванов, Л. Н. Лысенко. М.: Дрофа, 2004. 544 с.
3. *Миронов, А. В.* Основы астрофотометрии / А. В. Миронов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 260 с.
4. *Astrosurf* – Portail d'Astronomie des astronomes amateurs francopho [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.astrosurf.com/> Date of access : 05.03.2011.